



**Universidade de
Aveiro
2010**

Departamento de Física

**Cândida Maria Barros
Castro**

**Potencial Eólico – performance no Campus
Universitário Santiago**



**Universidade de
Aveiro
2010**

Departamento de Física

**Cândida Maria Barros
Castro**

**Potencial Eólico – performance no Campus
Universitário Santiago**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Mário de Almeida Rodrigues Talaia, Professor Auxiliar de nomeação definitiva do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho a todos aqueles que me apoiaram

o júri

presidente

Doutor. João de Lemos Pinto
professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutora Liliana do Carmo Santiago Fernandes Amada Caramelo
professora Auxiliar da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Doutor Mário de Almeida Rodrigues Talaia
professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que, ao longo de alguns anos, de alguma forma contribuíram para a minha formação acadêmica, profissional e pessoal assim como para a elaboração desta dissertação.

Em primeiro lugar, quero salientar a minha apreciação e agradecimento encarecido ao Professor Doutor Mário Talaia, pela forma como me orientou e pelo seu contributo, que foi imprescindível para o resultado final que é apresentado neste documento.

Agradeço aos meus familiares todo o apoio que me deram, e em especial à minha mãe, por sempre me apoiar e nunca me ter deixado desistir, pela coragem que sempre me transmitiu e por ser a minha referência.

palavras-chave

fonte renovável de energia, distribuição Weibull, potencial eólico, energia eólica, energia eléctrica estimada.

resumo

Os combustíveis fósseis têm condicionado a problemática das alterações climáticas e consequente aquecimento global. Nestas circunstâncias as políticas governamentais devem passar para a obtenção de energia limpa, por proporcionar um ambiente mais limpo e com melhor qualidade de vida. Portugal com uma situação geográfica privilegiada permite o desenvolvimento de tecnologia e o uso de diferentes fontes renováveis de energia. Na prática, a maioria das fontes renováveis de energia tem a sua origem em ciclos causados pela radiação solar. Esta situação faz com que as fontes renováveis de energia sejam consideradas praticamente inesgotáveis. Portugal, ao usá-las e ao fomentar o seu incremento, pode ser considerado um país de vanguarda. Nesta dissertação é avaliada a energia eólica disponível, ao longo do ano, no Campus Universitário Santiago da Universidade de Aveiro. Com base numa série de dados históricos de quatro anos, avalia-se o potencial eólico e estima-se a energia disponível que se pode obter com um aerogerador de eixo horizontal a 60m acima da superfície terrestre. Os resultados obtidos permitem conhecer a performance de uma eventual implantação de parque eólico no local de estudo.

keywords

renewable source of energy, Weibull distribution, wind potential, wind power, estimated electrical energy.

abstract

Fossil fuels have conditioned the debate on the current weather changes and consequent global warming. In these circumstances, governmental politics should privilege the use of cleaner sources of energy, due to the fact that these provide a cleaner environment and a better quality of life.

Portugal with its privileged geographical location, allows the development of technology as well as the use of renewable sources of energy. In practical terms, most of the renewable sources of energy have their origins in solar radiation induced cycles. This fact is what makes many consider this type of energies practically endless.

Portugal may be considered a vanguard country by using these type of energies and by promoting its expansion.

This dissertation evaluates the available wind energy throughout the year, at the Campus Universitário Santiago da Universidade de Aveiro.

According to four years of a series of historical data, the wind potential is measured, as well as the available energy that can be gathered with a horizontal axis aero generator, 60m above the Earth's surface.

The results obtained show the performance of an eventual wind power station, implemented at the place of study.

INDICE

Capítulo 1	1
1.1 Introdução	3
1.2 Estrutura da dissertação	8
Capítulo 2	9
2. Teoria	11
Capítulo 3	25
3. Resultados e análise	27
Capítulo 4	43
4. Considerações finais e perspectivas futuras	45
Referências	49

Capítulo 1



1.1 Introdução

A energia desempenha um papel fundamental em todas as actividades, nomeadamente nas económicas, e no seu desenvolvimento.

O desenvolvimento sócio-económico das últimas décadas caracterizou-se por um forte crescimento do consumo de energia produzida essencialmente a partir de combustíveis fósseis.

O aumento do consumo de petróleo que ocorreu na década de 70, associado ao seu constante aumento de preço, tornou a energia num importante factor de produção. Passou a ser uma problemática em termos mundiais e em termos políticos. Neste contexto, os choques petrolíferos ocorridos nos anos 70 e, posteriormente, as situações semelhantes ocorridas nos anos 80 impuseram a necessidade de alterar o modelo de desenvolvimento, o modo de encarar a energia como factor de produção bem como de questionar a forma de exploração dos recursos naturais do nosso Planeta, a Terra.

A nível mundial houve e há interesse em minimizar o efeito de estufa condicionado por gases de efeito de estufa. Vejamos, no Protocolo de Montreal, realizado em 1987, foram identificadas as principais substâncias destruidoras da camada de ozono, estabeleceu-se um cronograma para a redução e, por fim, a eliminação do seu uso. Foi considerado o fim do consumo e produção de clorofluorcarbonetos (CFC's) a partir de 1 de Julho de 1989. A Declaração de Helsínquia sobre o Protocolo de Montreal, realizada em 1989, teve a ver com uma reunião das partes do Protocolo de Montreal sobre as substâncias que reduzem a camada de ozono, na qual treze nações industriais acordaram em parar ou suspender a produção de CFC's até 2000. No Protocolo de Quioto, realizado em 1997, foi negociado que para o horizonte compreendido entre os anos 2008 e 2012 as emissões de gases fossem reduzidas em média 5,2% face aos níveis estabelecidos para 1990, nomeadamente para dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, e face aos níveis para 1995 para hexafluoreto de enxofre, famílias de hidrofluorcarbonos e perfluorcarbonos. Apenas como informação é digno de nota que uma estimativa,

elaborada na altura, dava para cada cidadão uma produção média anual de dióxido de carbono de 2,3 toneladas para um cidadão da CE e de 5,2 toneladas para um cidadão norte-americano. Em Bali, Indonésia, realizou-se em 2007, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas. Chegou-se a um acordo que lançou o Mapa do Caminho para as negociações de clima nos próximos dois anos, com um objectivo de "cortar" as emissões de gases de efeito estufa até 2020 dos países desenvolvidos entre 25-40%, abaixo dos níveis medidos em 1990.

Adicionalmente, o IV Relatório do IPCC (Painel Intergovernamental de Alterações Climáticas) indicou a necessidade em se manter o aquecimento global inferior a uma temperatura de 2°C. Nestas circunstâncias, é preciso reduzir, já, as emissões globais.

Também, a transferência de tecnologia de países industrializados para as economias emergentes foi um dos pontos fortes do acordo de Bali e, junto com o mercado de carbono global, poderão trazer benefícios reais para os países em desenvolvimento, como a China, a Indonésia (abate de árvores é considerada a principal fonte de emissão de gases de efeito de estufa) e o Brasil (cerca de 75% da emissão de gases de efeito de estufa são via abate de árvores e queimadas).

Em 2009 foi realizada entre os dias 7 e 18 de Dezembro, em Copenhague, Dinamarca a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (ou Conferência de Copenhague ou Cimeira de Copenhaga). Esta cimeira, organizada pelas Nações Unidas, reuniu líderes mundiais para discutir como reagir às mudanças climáticas (aquecimento global). A Cimeira foi considerada pela imprensa mundial como uma conferência com algum carácter polémico. Também não atingiu os planos de discussão desejados.

Face aos pressupostos anteriormente citados, as fontes renováveis de energia devem, por isso, ser encaradas como pilares ou verdadeiros alicerces para a sustentabilidade do planeta Terra.

Vivemos globalmente um momento de mudança devido à necessidade de responder ao desafio criado pelas alterações climáticas e pela necessidade de reduzir

a dependência de combustíveis fósseis. Este desafio cria muitas oportunidades; mais investigação e desenvolvimento tecnológico, mais investimento inovador e mais empregos. Poderemos estar à beira de uma revolução tecnológica com uma importância semelhante à ocorrida nas Tecnologias da Informação e da Comunicação (Ministério da Economia e da Inovação - Portugal, 2007).

Portugal aprovou nos últimos anos um conjunto ambicioso de medidas para promoção das fontes renováveis de energia. A Estratégia Nacional para a energia estabeleceu vários objectivos, nomeadamente a criação de um quadro organizativo estável e transparente para o sector, e permitiu uma expansão sem precedentes do investimento em fontes renováveis de energia. O desenvolvimento desta estratégia está a tornar Portugal numa referência a nível mundial em termos de energia eólica. Veja-se o caso do Cluster Industrial Eólico localizado em Viana do Castelo. Aqui, da área que está concessionada aos Estaleiros Navais de Viana do Castelo, havia uma zona de cerca de 200.000m² que praticamente não estava a ser utilizada, tendo sido concessionados cerca de 106.000m² à ENEOP - Eólicas de Portugal. Este terreno tem a particularidade de possuir um cais, gerido por estaleiros, que facilita o rápido escoamento da produção, dando a este complexo, características únicas e de grande competitividade à escala mundial. Em Novembro de 2007 foi inaugurada a primeira fábrica de pás de rotor portuguesa, implantada na Zona empresarial da Praia Norte e ocupando uma área de 25.000m². Esta fábrica está a produzir de 4 a 5 pás por semana, de 40 metros de comprimento (utiliza como matéria prima: fibra de vidro, madeira de balsa e espumas que são conformadas em três moldes). Estima-se que a fábrica venha a produzir até 12 pás por semana. A produção dos quatro primeiros anos destina-se a satisfazer as necessidades nacionais (de 150 a 200 torres por ano, o que equivale a cerca de 600 pás por ano). A partir do quarto ano espera-se que comece a exportar para o Sul da Europa, nomeadamente para a Espanha, França, Grécia, Itália, e outros (Ordem dos Engenheiros, 2008).

É sabido que a energia eólica depende essencialmente das características do vento, que transforma a energia cinética do vento em energia eléctrica. O vento é

uma fonte renovável limpa e considerada inesgotável que pode ser usada hoje, amanhã e no futuro. É gratuita.

A energia eólica surgiu, nos últimos anos, como uma das fontes renováveis de energia com maior viabilidade de exploração. De facto, os custos de exploração baixaram significativamente nos últimos anos.

Em 2001, Portugal lançou o programa Eficiência Energética e Energias Endógenas ou Programa E4. Nos anos seguintes surgiram algumas medidas resultantes da Resolução do Conselho de Ministros, nomeadamente a 63/2003 e 169/2005, com realce para a Estratégia Nacional para Energia de 2005. Todas estas medidas surgiram como objectivo de alcançar a meta estipulada pela UE para a produção de electricidade a partir de fontes renováveis e fomentar a eficiência energética. De realçar que a UE definiu, para 2020, a meta de que 20% da energia primária deverá ser de origem renovável.

Desde então tem-se verificado um aumento progressivo do volume de integração de energia transformada através das energias renováveis e em especial a de base eólica devido, essencialmente, à sua disponibilidade como recurso de Portugal, à remuneração atractiva e à maturidade da tecnologia.

Em Portugal e de acordo com uma Resolução do Conselho de Ministros, em 2003, a meta traçada para a energia proveniente das fontes renováveis era de 4603MW para 2001 e até 9680MW para 2010. A maior fatia de investimento recaiu sobre a energia eólica em cerca de 3750MW. À energia hídrica cabia uma fatia em cerca de 1000MW. Nestes termos a situação energética portuguesa apresentaria um total de cerca de 3750MW para a energia eólica e de cerca de 5400MW para a energia hídrica. São duas vias energéticas que são complementares na viabilização de um projecto. De facto, estas duas fontes têm custos por tecnologia bastante atractivos (melhor para a energia eólica).

O relatório da REN (Rede de Electricidade Nacional) referente à Energia Eólica em Portugal, para o 1º semestre de 2008, teve como objectivo uma apresentação sintética da evolução da potência e produção eólica em Portugal Continental durante

os primeiros 6 meses de 2008, suas características e dimensão relativa no Sistema Eléctrico Nacional (SEN). No relatório é referido que no 1º semestre de 2008 a potência instalada aumentou 276MW. Desta nova potência, 61% foi instalada no parque do Alto Minho I, que em 31 de Dezembro de 2007 tinha instalado 11MW e que no final do semestre contava com 180MW, faltando ainda 60MW para completar o projecto. Também ligado à Rede de Transporte, o parque Ventos da Gardunha adicionou 16MW aos 64MW instalados no final do ano anterior, faltando somente 3 aerogeradores para a sua conclusão. A restante potência refere-se a 5 novos parques de menor dimensão. Desta forma a potência eólica instalada aumentou 14%. O ritmo de entrada em funcionamento de novas instalações foi superior ao verificado no mesmo período do ano anterior em que foram ligados à rede 215MW. No final do semestre encontravam-se em funcionamento 161 parques, dos quais 9 ligados à Rede de Transporte, com uma potência total de 2244MW, repartida por 778MW ligados à Rede de Transporte e os restantes 1466MW à Rede de Distribuição. A potência eólica ligada à rede representava cerca de 16% do total da capacidade instalada no SEN.

Em Portugal, a evolução no 1º semestre da produção eólica por consumo registou os seguintes dados: em 2006, a produção eólica (1164GWh) representou cerca de 5% face ao consumo do SEN (24630GWh); em 2007, a produção eólica (1922GWh) representou cerca de 8% face ao consumo do SEN (24994GWh); em 2008, a produção eólica (2742GWh) representou cerca de 11% face ao consumo do SEN (25207GWh), ou seja no 1º semestre de 2008 a produção eólica totalizou 2742GWh, aumentou cerca de 70% face ao mesmo período do ano anterior e abasteceu cerca de 11% do total da energia eléctrica em Portugal.

Relativamente ao 1º semestre de 2008 a potência instalada, em Portugal, teve a seguinte evolução: ano 2006, a eólica 1177MW representou 11% do valor da SEN de 13148MW; ano 2007, a eólica 1731MW representou 12% do valor da SEN de 13871MW; ano 2008, a eólica 2244MW representou 16% do valor da SEN de 14397MW;

1.2 Estrutura da dissertação

A dissertação é constituída por quatro capítulos.

No primeiro capítulo descreve-se a relevância da temática investigada.

No segundo capítulo é considerada alguma teoria que está na base dos cálculos efectuados e apresentados para a determinação de alguns parâmetros eólicos e avaliação do potencial para o local de estudo.

No terceiro capítulo são apresentados resultados e é feita uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos.

No último capítulo apresentam-se algumas considerações finais e traçam-se algumas orientações em termos de trabalho futuro.

Capítulo 2



2. Teoria

O vento considera o ar em movimento com uma determinada intensidade e direcção e, resulta do deslocamento de massas de ar, devido ao aparecimento de diferenças de pressão. Estas estão associadas ao principal factor que é a radiação solar que condiciona processos de aquecimento ou arrefecimento de massas de ar.

O albedo que mede o valor da energia que é reflectida por uma superfície e a capacidade térmica da superfície são também importantes factores que devem ser valorizados. Numa alta pressão ou anticiclone o ar desce e diverge dirigindo-se para uma baixa pressão ou ciclone onde converge e sobe.

É sabido que o aquecimento ou arrefecimento de uma superfície terrestre e do mar é diferente dos pólos para os trópicos, o que origina o deslocamento de fluxos de energia sob a forma de calor entre estas zonas, sendo o vento um “transportador” dessa energia. Este circuito de fluxos de vento seria sempre perpendicular às isóbaras se não houvesse influência do movimento de rotação da Terra. Assim aparece uma força, a chamada força de Coriolis que depende da latitude do local e da velocidade do “pacote de ar”, que desvia o movimento do ar para a direita no Hemisfério Norte (Holton, 2004).

Para perceber como ocorre a circulação de ar nos anticiclones e ciclones, é necessário compreender o conceito de equilíbrio de forças.

Fala-se em equilíbrio da pressão atmosférica quando esta possui iguais valores junto ao solo, no entanto devido à existência de variações de pressão, essa situação de equilíbrio não se verifica. Quando ocorrem diferenças de pressão, a atmosfera tentará repor valores de pressão iguais. Como consequência haverá movimento de ar proveniente de um anticiclone em direcção a um ciclone, como se ilustra na Figura 1.

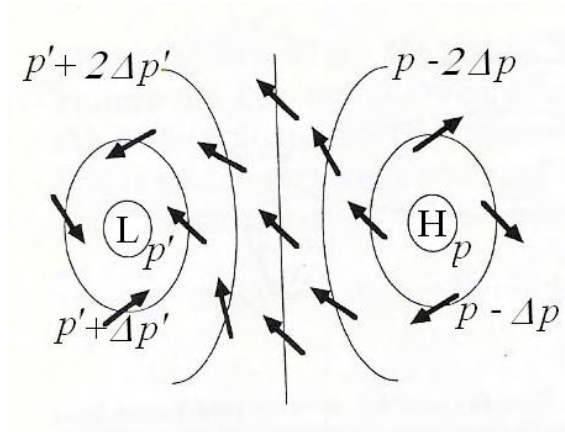


Figura 1 - Movimento do ar das altas para as baixas pressões
[adaptado de Holton (2004)]

Na Figura 1, L representa um ciclone e H um anticiclone.

O vento junto ao solo é originado devido às diferenças de pressão que aí se registam. A força que faz com que o ar se desloque das altas para as baixas pressões designa-se por força de gradiente de pressão.

A Terra não está em repouso, apresentando um movimento de rotação em torno do seu eixo. Assim é gerada uma força denominada de força de Coriolis (para movimentos à escala sinóptica, não pode ser desprezada), sendo que faz sempre um ângulo recto com o movimento do ar ou seja com o vector velocidade do "pacote de ar". A sua acção vai fazer com que o deslocamento do ar, em relação ao seu movimento inicial, seja desviado para a direita no Hemisfério Norte (HN), como se ilustra na Figura 2.

Na Figura 2, no instante inicial a força de Coriolis é nula pois também é nula a velocidade do "pacote de ar". Quando o "pacote de ar" inicia o movimento por acção da força gradiente de pressão, surge imediatamente a força de Coriolis perpendicular à velocidade e proporcional a esta. A trajectória do "pacote de ar" será portanto desviado para o lado em que actua a força de Coriolis. Estabelece-se assim o equilíbrio entre a força gradiente de pressão e a força de Coriolis.

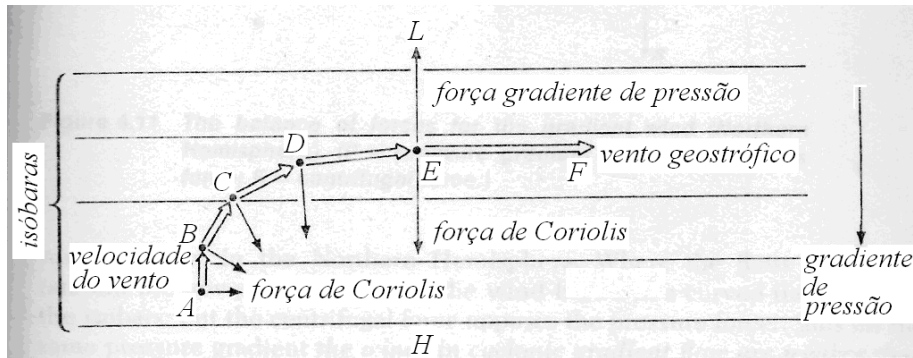


Figura 2 - Movimento de um "pacote de ar": aproximação geostrófica (HN)

Note-se que se houver alteração na distribuição das pressões demorará um certo intervalo de tempo a restabelecer-se o equilíbrio. Chama-se ainda a atenção que esta solução de diagnóstico para o vento geostrófico não é aplicável nas regiões equatoriais, isto é, na faixa equatorial de 15°N e 15°S (não há equilíbrio entre a força de Coriolis e a força gradiente de pressão). Nas latitudes médias e altas verifica-se que o vento na atmosfera livre é quase geostrófico. A aproximação geostrófica é portanto útil porque pode ser utilizada numa grande parte do globo para estimar ventos a partir da distribuição da pressão atmosférica.

Existe também uma força adicional que vai alterar a direcção do vento denominada de força de atrito, que actua junto ao solo e não só muda a direcção como reduz a intensidade do vento, como se ilustra na Figura 3.

Como consequência, no ciclone o ar irá circular para *dentro* (há convergência) e no anticiclone o ar irá circular para *fora* (há divergência), como se mostrou na Figura 1. Assim, quando o ar chega a um determinado local, proveniente de diferentes direcções (convergência), terá de continuar o seu movimento. Como consequência, se o ar estiver junto ao solo, terá de ascender na atmosfera. Quando num determinado ponto o ar se afasta em todas as direcções (divergência), isso significa que proveio de uma maior altitude.

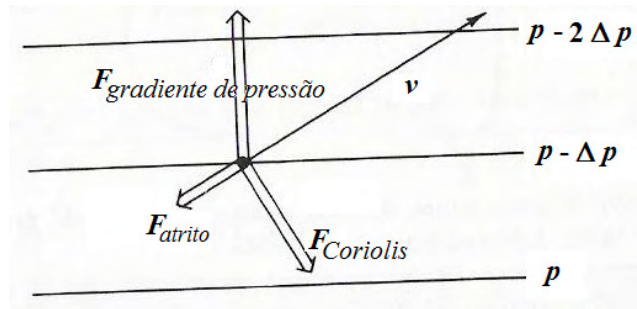


Figura 3 - Balanço das forças: gradiente de pressão, de Coriolis e de arrasto (turbulência)

Quando o ar sobe, a sua temperatura diminui. Se essa diminuição de temperatura for suficiente em atingir uma temperatura igual ou inferior à do ponto de orvalho, haverá condições para que o vapor de água condense e consequente formação de nuvens. Esta situação, onde ocorre convergência e subida de ar, está associada à formação de nuvens e pode ocorrer precipitação.

Por outro lado, nos anticiclones ocorre divergência e descida ou acumulação de ar junto ao solo. Ao descer, a sua temperatura aumenta, o que favorece uma diminuição da humidade relativa do ar. Nestas circunstâncias não ocorre condensação de vapor de água, não há formação de nuvens e promove condições de bom tempo.

O vento horizontal tem uma componente dirigida para a pressão mais baixa, com se indica na Figura 3. Esta situação implica em convergência de massa em circulação ciclónica e em divergência de massa em circulação anticiclónica, a qual por continuidade de massa requer movimento vertical para fora e para dentro da camada limite, respectivamente.

O potencial eólico de um local pode ser influenciado quando há influência de brisa. No litoral, local de estudo desta investigação, a brisa terrestre (vento que sopra geralmente durante a noite, da superfície terrestre para o mar) e brisa marítima (vento que sopra geralmente durante o dia, do mar para a superfície terrestre) podem afectar positivamente ou negativamente o potencial eólico. Nesta investigação não se avaliou o efeito da presença da brisa. De facto, não foi possível obter dados medidos a vários níveis da torre existente de 30m, localizada no Campus Universitário.

Na Europa, em 1989, foi criado o Atlas Europeu do Vento com dados obtidos a partir de estações meteorológicas que foram tratados e extrapolados para outras áreas, como se mostra na Figura 4.

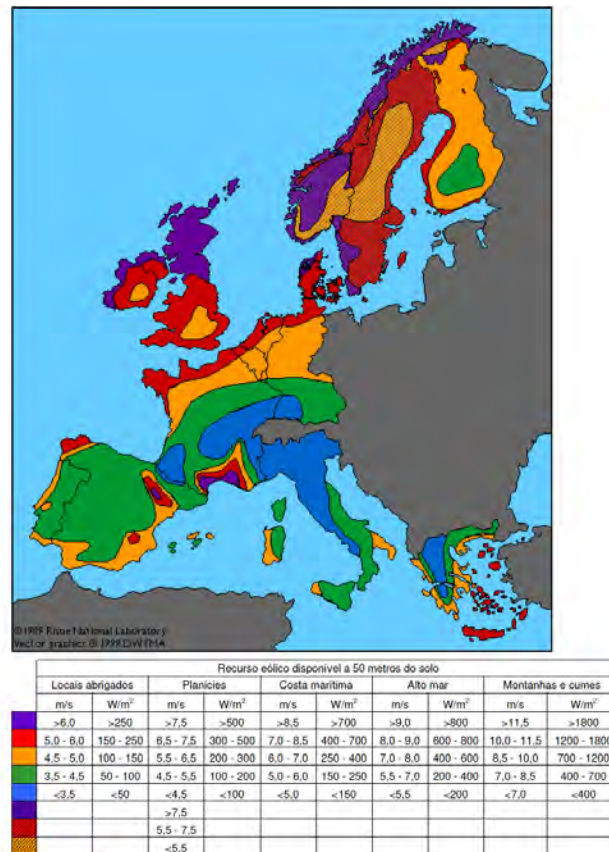


Figura 4 - Atlas europeu do vento (<http://www.windatlas.dk>)

A Figura 4 indicia para o local de estudo, costa marítima, um recurso eólico disponível a 50m do solo de $6,0-7,0\text{m.s}^{-1}$. A Norte de Portugal a região Norte da Galiza parece apresentar excelentes condições para recursos eólicos.

Para conhecer a performance de um local em termos de fonte renovável de energia eólica é fundamental caracterizar o vento. Este pode "soprar" em todas as direcções, não tem uma direcção definida. A variação da velocidade e direcção do vento acima da superfície do solo não segue um modelo definido (há influencia local e planetária).

O vento é um recurso variável (em tempo e espaço). Como não podemos controlar estas variações, a turbina eólica ou seja o aerogerador deve ser seleccionado dentro de parâmetros compatíveis (a estas variações).

As variações da velocidade do vento no tempo podem ser divididas em variações intra-anual, anual, diárias e de pequenos períodos.

Para se ter todos os ciclos anuais e obter uma média anual da velocidade do vento que possa ser considerada "confiável" num determinado local é importante considerar valores históricos de pelo menos um ano. O melhor, seria considerar dados registados, pelo menos, de 10 anos.

Nesta dissertação são considerados para o local de estudo, Campus Santiago da Universidade de Aveiro, quatro anos de dados históricos, sendo o último ano considerado 2007.

Esperava-se investigar a relação entre o potencial eólico do local e o consumo de energia do Departamento de Física localizado no referido Campus. Esta análise permitiria conhecer que tipo de aerogerador a usar seria mais apropriado. Infelizmente, este objectivo inicial não foi possível levar a efeito pois os dados "prometidos", por várias vezes, nunca foram cedidos, o que anulou um dos objectivos iniciais desta investigação.

A variação anual é uma das mais importantes variações quando queremos comparar as conveniências de um terreno de uma região ou quando queremos seleccionar a melhor região.

Num projecto de carácter eólico há parâmetros eólicos que devem ser valorizados. Como básicos tem-se velocidade do vento, direcção do vento, turbulência e temperatura do ar e como opcionais tem-se velocidade vertical do vento, radiação solar e pressão atmosférica.

Existem modelos simples da meteorologia física que investigam a variação de temperatura com a altitude. Na ausência de inversões térmicas a temperatura diminui com a altitude.

A velocidade média do vento é o principal parâmetro utilizado para indicar o potencial eólico de uma região. Na prática, o potencial eólico depende do cubo da velocidade. Os dados de velocidade do vento registados a diferentes alturas são, geralmente, usados para a caracterização do gradiente vertical de velocidade de vento e cálculo de desempenho de turbinas eólicas.

No Campus Santiago a velocidade do vento é registada a 10 m (acima da vegetação). Modelos para a estimativa do vento a 60m de altitude (foi a altura assumida para uma eventual instalação de aerogeradores de eixo horizontal) podem ser usados. Dadas as características do local e na ausência de dados de uma torre de 30m, como referido anteriormente, avaliou-se a velocidade do vento usando a lei da potência do vento. A lei logarítmica é aplicável nas situações que é conhecido para dois níveis a velocidade do vento, ou quando é conhecida a rugosidade do terreno ou quando é conhecida a velocidade de corte do local.

A lei da potência para o local de estudo usa $\alpha = 0,15$. Este valor considerado é uma boa aproximação, dado o local de estudo estar próximo ou estar na zona costeira.

A lei da potência baseia-se numa dedução que assenta numa base científica, apesar de alguns dos seus coeficientes serem empíricos e obtidos experimentalmente. Conforme mostrou Verdecia (1997), verificou-se que a partir de dados meteorológicos medidos em várias estações e em situações de estabilidade diversa, que a variação da velocidade do vento em toda a camada limite atmosférica (camada interior + camada exterior) era descrita com bastante precisão pela seguinte expressão empírica

$$\frac{v(z)}{v(z_1)} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

em que z_1 representa a altura de referência à qual é registada a velocidade $v(z_1)$, z a altura à qual é avaliada a velocidade $v(z)$ e α o parâmetro que depende do local ou seja da rugosidade da superfície terrestre e da estabilidade atmosférica (medida pelo gradiente da temperatura potencial). A temperatura potencial θ de uma partícula de ar é a temperatura que resultaria de um processo de compressão ou

expansão adiabaticamente reversível da partícula, inicialmente a uma temperatura T e a uma pressão p até uma pressão standard (padrão), normalmente 1000hPa. No caso de estudo, como já referido, assumiu-se $\alpha = 0,15$, tendo-se em conta que o local é plano, não somente do ponto de vista topográfico, mas também pela presença da Ria e pela proximidade com o mar, factores que reproduzem condições de vento semelhantes às de uma região desértica.

O conhecimento da direcção predominante do vento é importante para identificar os terrenos com orientação favorável e determinar a posição de turbinas eólicas isoladas ou em centrais eólicas. A rosa de ventos deve ser traçada para diferentes situações.

A temperatura do ar é um parâmetro importante para o desempenho das turbinas eólicas (quantidade de energia gerada) e para o conhecimento das condições de operação do equipamento. Os dados de radiação solar quando utilizados conjuntamente com a velocidade do vento e a hora do dia podem representar um indicador de estabilidade atmosférica. O potencial eólico depende, também, da temperatura do ar, da pressão e consequente da massa volúmica do ar. Vários modelos podem ser usados, sendo o modelo de uma atmosfera real o que fornece melhores resultados. O modelo para uma atmosfera isotérmica (considerando a temperatura média da camada) dá resultados aproximados.

É sabido e aceite que a distribuição das velocidades segue o modelo da distribuição de Weibull [Henessey (1977); Justus *et al.* (1978) e Gupta (1986)], dada pela expressão,

$$f(x, k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-(x/\lambda)^k} \quad (2)$$

em que x representa a velocidade do vento, k o parâmetro de forma e λ o parâmetro de escala, sendo valores positivos.

O valor da velocidade para o qual ocorre o máximo da curva foi avaliado de acordo com a aplicação da expressão,

$$v_{\max} = \lambda \left(\frac{k-1}{k} \right)^{1/k} \quad k > 1 \quad (3)$$

O potencial eólico é uma das informações mais importantes num projecto de viabilidade. A energia por unidade de tempo e por unidade de área, ou a potência por unidade de área, produzida pelo vento é dada por

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (4)$$

em que ρ é a massa volúmica do ar e v é a velocidade do vento.

Multiplicando-se a potência gerada por cada velocidade do vento pela probabilidade de cada velocidade na distribuição das velocidades de Weibull, obtém-se a distribuição da energia do vento para as diferentes velocidades, que é a chamada densidade de potência. A modelação da velocidade de vento efectuada recorrendo à distribuição de Weibull de dois parâmetros permite representar a variação média do vento. Usa, como já referido, dois parâmetros designados: parâmetro de escala e parâmetro de forma (Justus *et al.*, 1978).

Na prática, a distribuição estatística da velocidade de vento é uma importante característica para a avaliação do potencial energético do vento, seu desempenho em sistemas de conversão de energia, bem como para o desígnio estrutural e ambiental.

A avaliação da velocidade dos ventos pode ser realizada usando a função de distribuição de frequências de Weibull (Li and Li, 2005). A distribuição de Weibull (amplamente utilizada pelo sector eólico, possibilita a realização de prognósticos aproximados da produção futura de energia eléctrica) é representada pela seguinte equação

$$f_w = p(v) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda} \right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{\lambda} \right)^k} \quad (5)$$

onde f_w representa a frequência ou a probabilidade $p(v)$ de ocorrência de cada velocidade v . O símbolo k representa o parâmetro de forma de Weibull (adimensional) e λ o parâmetro de escala de Weibull com unidades de velocidade. São parâmetros que definem a distribuição estatística e estão relacionados,

respectivamente, com a forma da curva de distribuição e à velocidade média dos ventos.

Em zonas onde existem alguns dados meteorológicos (como é o caso do local de estudo), a variabilidade da velocidade do vento é representada em *distribuições de frequência*, sendo a mais utilizada a distribuição de Weibull, uma distribuição de probabilidade de dois parâmetros.

A probabilidade da velocidade do vento ter um determinado valor é dada pela expressão (5).

A velocidade média do vento e o parâmetro de escala indicam como é, em média, a zona em estudo no que se refere à velocidade dos ventos. O parâmetro de forma indica o grau de concentração da distribuição, ou seja, se as velocidades do vento tendem sempre a estar próximas de um certo valor. Assim, a distribuição que tem um valor elevado de k será uma distribuição muito concentrada num dado valor.

A distribuição de Weibull (2 parâmetros) para a velocidade do vento pode ser expressa pela densidade de probabilidade

$$p(v)dv = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k} dv \quad (6)$$

Sendo a função de probabilidade acumulada dada por

$$p_i(v \leq v_i) = \int_0^{v_i} p(v)dv = 1 - e^{-\left(\frac{v_i}{\lambda}\right)^k} \quad (7)$$

Os parâmetros λ e k podem ser determinados a partir da expressão (7) quando transformada na forma linear (Justus *et al.*, 1978).

Assim sendo,

$$e^{-\left(\frac{v_i}{\lambda}\right)^k} = 1 - p_i \Leftrightarrow -k \ln \lambda + k \ln v_i = \ln[-\ln(1 - p_i)] \quad (8)$$

A expressão (8) pode ser representada por uma equação de recta do tipo

$$y_i = a + bx_i \quad (9)$$

em que $y_i = \ln[-\ln(1 - p_i)]$, $x_i = \ln v_i$, $a = -k \ln \lambda$ e $b = k$.

Nestes termos, a determinação dos parâmetros λ e k fica condicionada ao cálculo dos coeficientes a (ordenada) e b (declive) da recta. Os coeficientes podem ser obtidos pelo método dos desvios mínimos quadrados; MDMQ, aplicado ao conjunto de dados (x_i, y_i) ou seja para $x_i = \ln v_i$ e $y_i = \ln[-\ln(1 - p_i)]$ obtidos dos valores de v_i e p_i , que por sua vez são determinados a partir das séries observadas da velocidade do vento distribuídas em n intervalos de classes com as suas respectivas frequências. O grau de ajuste das séries (por aplicação do modelo de Weibull) pode ser investigado através do erro residual (Justus and Mikaeil, 1976) calculado por

$$E^2 = \sum_i^n [p_{i(obs)}(v \leq v_i) - p_{i(cal)}(v \leq v_i)]^2 \quad (10)$$

onde $p_{i(obs)}$ é a probabilidade acumulada observada e $p_{i(cal)}$ a probabilidade acumulada calculada através do modelo de Weibull.

Na Figura 5 mostra-se um exemplo (a partir de dados de velocidade de vento para um período em análise)

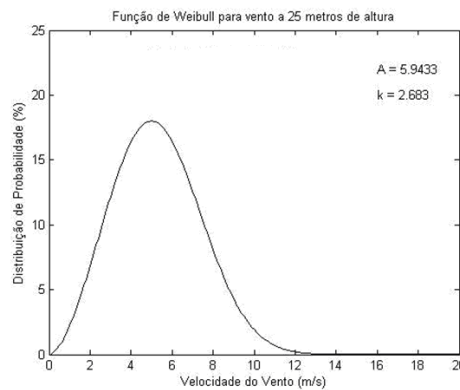


Figura 5 - Função de Weibull para vento (um exemplo)

A distribuição das velocidades do vento não é, em geral, simétrica. Embora se registem velocidades de vento muito elevadas, estas são pouco frequentes, predominando as velocidades mais moderadas.

Esta distribuição estatística da velocidade do vento varia de local para local, dependendo das condições climáticas locais, do relevo e da superfície. Portanto, a

distribuição de Weibull pode variar tanto na forma como no valor médio. Note-se, contudo, que a distribuição de Weibull é uma aproximação (analítica, muito utilizada e adaptada a esta realidade) à distribuição real. Na prática, tem-se em cada ponto a distribuição de Weibull mais próxima da realidade numa qualquer medida.

É portanto necessário ponderar a probabilidade de cada valor da velocidade com a correspondente potência. Esta necessidade deve-se ao facto de a potência obtida a partir da energia cinética do vento ser proporcional ao cubo da velocidade. Assim, os valores elevados, menos frequentes da velocidade do vento, contribuem pouco para o valor médio mas têm uma forte contribuição para a potência obtida.

Os valores da temperatura do ar e da pressão projectadas ao nível de 60m permitiu calcular a massa volúmica média do ar e a densidade de potência. A potência utilizável é dada pela expressão

$$\frac{P}{A} = c_p \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (11)$$

sendo o coeficiente de potência teórico (no limite de Betz) $c_p \cong 0,59$, segundo a lei de Betz.

Quanto maior o comprimento das pás do gerador eólico, maior a área que este abrange e, conseqüentemente mais energia mecânica pode ser extraída do vento. Mas, há que se ter em conta dois factores: normalmente as turbinas só actuam quando a velocidade do vento se encontra acima dos $3\text{--}5\text{m.s}^{-1}$ e abaixo dos 25m.s^{-1} e os geradores eólicos possuem um rendimento médio em torno dos 20% (não se consegue extrair toda a energia de entrada no corredor cilíndrico devido ao varrimento da área das pás).

A velocidade do vento é uma componente dominante no valor da potência eólica, dado que depende fortemente da velocidade (cubo da velocidade). Esta dependência acentua-se na zona não linear da curva, dado que uma pequena variação na velocidade de vento pode provocar uma grande variação na produção de um aerogerador e por consequência no parque eólico, pelo que é primordial na previsão da produção eléctrica

de parques eólicos a optimização dos parâmetros do modelo de previsão para esta zona da curva de potência, como se ilustra na Figura 6.

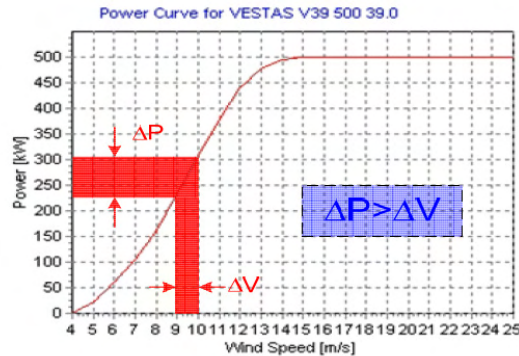


Figura 6 - Curva de potência do aerogerador V39 da Vestas
(http://www.windturbines.ca/vestas_v39_500.htm)

A análise da Figura 6 mostra ainda que nesta zona da curva que uma pequena incerteza na previsão do vento resulta numa amplificação da incerteza na previsão de potência, por outro lado, para velocidades de vento entre 15 e 25 m.s^{-1} , o erro na previsão da velocidade de vento é praticamente anulado na previsão de potência.

A curva de potência indicada na Figura 7, para além de evidenciar a forte dependência da variação da potência face à variação da velocidade, também representa as zonas de *cut-in*, *cut-off* e *rated-speed*. A zona de *cut-in* definida como a gama de 0 e 3-4 m.s^{-1} corresponde à zona de arranque do aerogerador. Na zona *cut-off*, o aerogerador, por questões de segurança relacionadas com os esforços mecânicos a que fica sujeito, é obrigado a parar por acção dos travões mecânicos ou proceder a um controlo da velocidade de rotação.

Na Figura 7 é mostrada para o mesmo aerogerador V39 da Vestas a curva do coeficiente de potência C_p . Este coeficiente depende do tipo de máquina e das condições de controlo da mesma. Como se pode verificar, para o modelo de aerogerador apresentado, as velocidades de vento que apresentam maior extracção de energia estão compreendidas entre 6 e 12 m.s^{-1} . Os aerogeradores actuais têm um valor máximo para C_p de cerca de 45%.

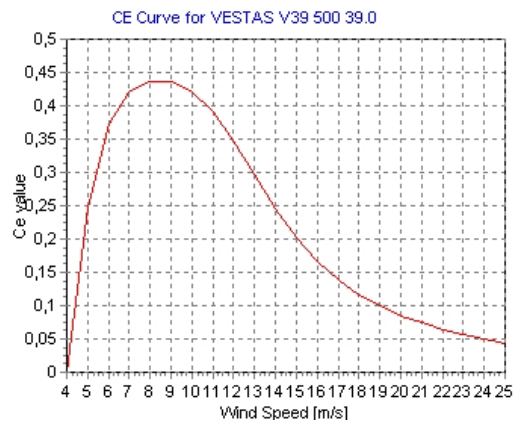


Figura 7 - Coeficiente de potência "versus" velocidade do vento
Aerogerador V39 da Vestas (http://www.windturbines.ca/vestas_v39_500.htm)

Capítulo 3



3. Resultados e análise

Para o conjunto de dados registados no Campus Santiago da Universidade de Aveiro investigou-se o comportamento dos ventos.

Usou-se um algoritmo desenhado e já criado em MatLab, tendo por base as equações que condicionam o potencial eólico.

Considerou-se o cenário da instalação de um aerogerador a um nível de 60m (aerogerador de eixo horizontal). Por não ter sido recepcionado em devido tempo a informação prometida de consumos energéticos, deixou, de ser objectivo deste estudo a análise do melhor aerogerador disponível no mercado, nem foi considerado um cenário de produção de energia eléctrica com base num modelo particular de turbina. Nestes termos, basicamente pretende-se conhecer a distribuição dos ventos, a distribuição das velocidades do vento, o potencial eólico e a estimativa de energia disponível.

Os gráficos indicados nas Figuras 8 à 19 mostram, para cada mês do ano, o comportamento da velocidade média ponderada do vento e a sua distribuição por ângulo. De notar que os valores de cada mês do ano incluem o conjunto de dados da série investigada, para esse mês.

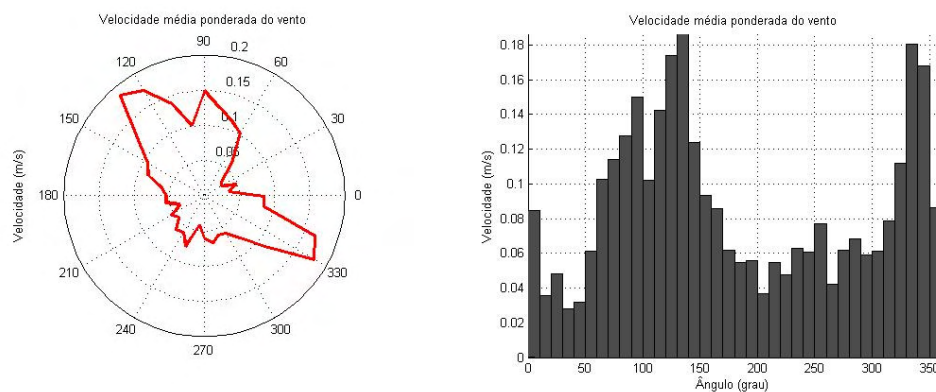


Figura 8 - Velocidade do vento - mês de Janeiro (série)

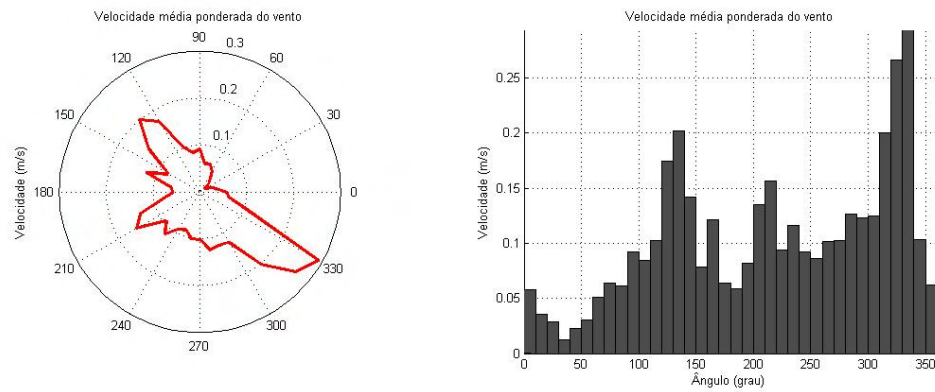


Figura 9 - Velocidade do vento - mês de Fevereiro (série)

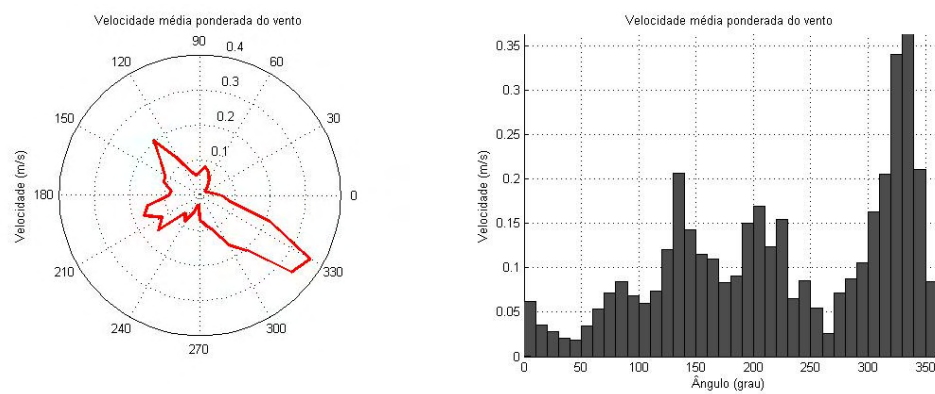


Figura 10 - Velocidade do vento - mês de Março (série)

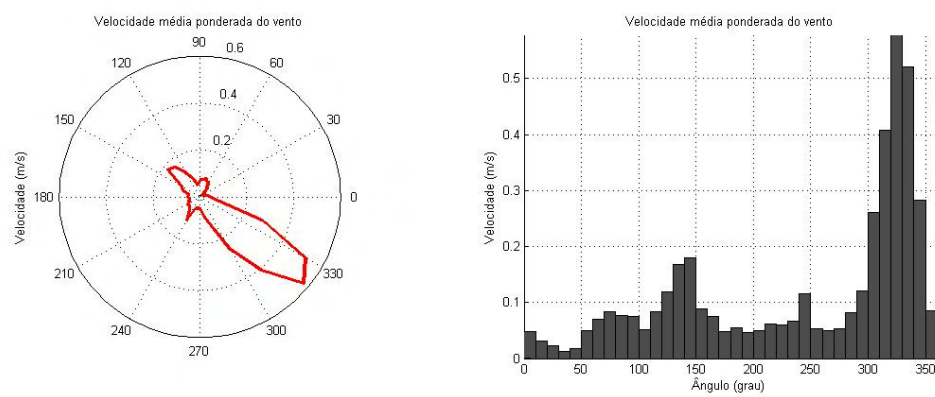


Figura 11 - Velocidade do vento - mês de Abril (série)

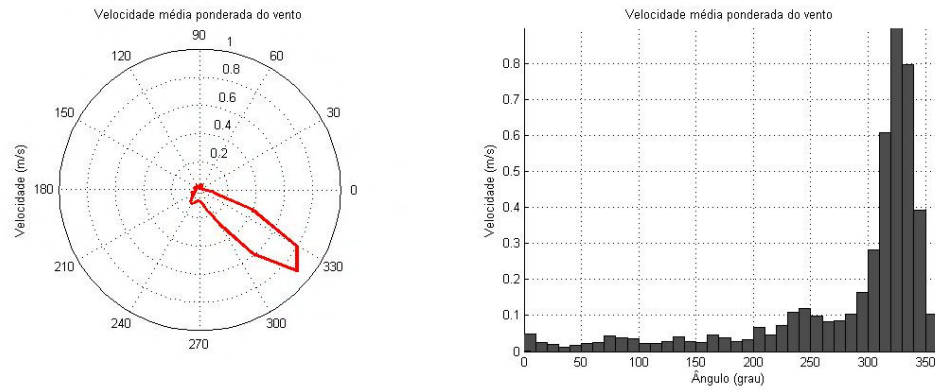


Figura 12 - Velocidade do vento - mês de Maio (série)

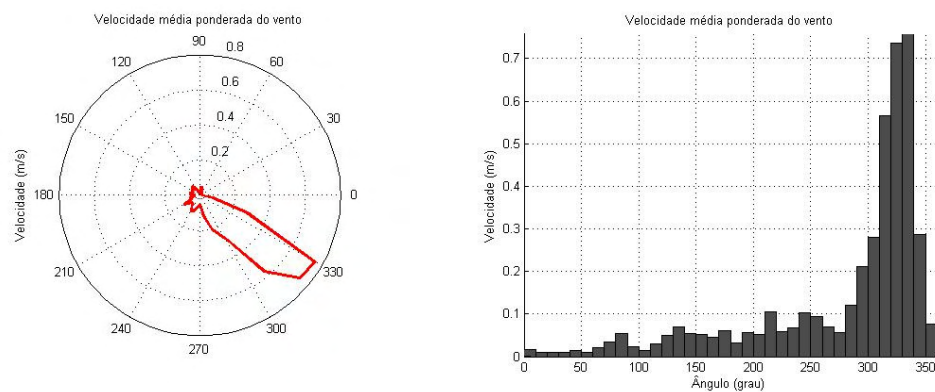


Figura 13 - Velocidade do vento - mês de Junho (série)

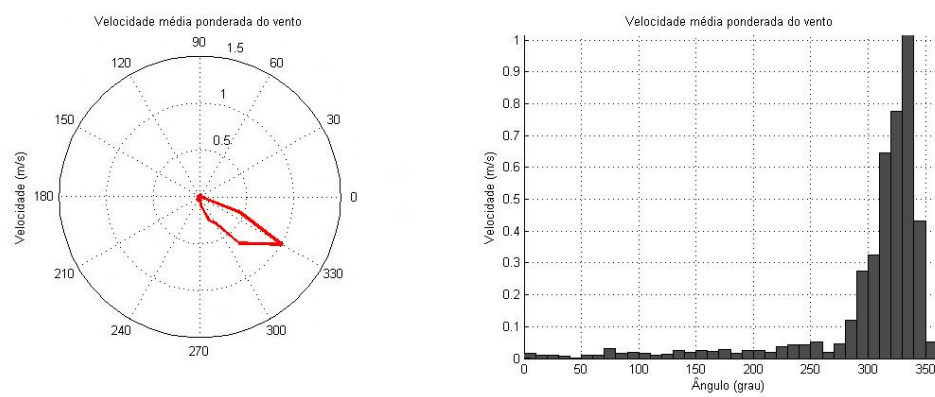


Figura 14 - Velocidade do vento - mês de Julho (série)

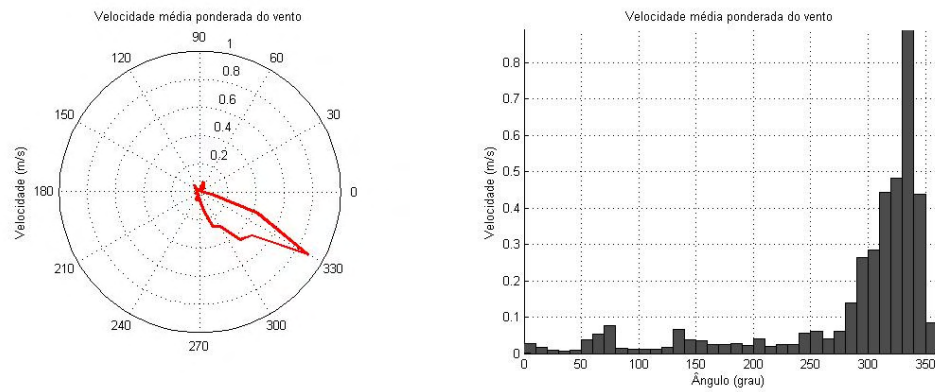


Figura 15 - Velocidade do vento - mês de Agosto (série)

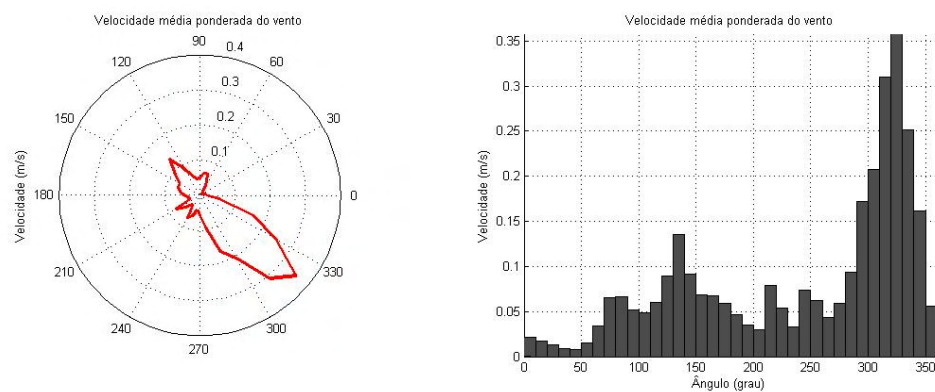


Figura 16 - Velocidade do vento - mês de Setembro (série)

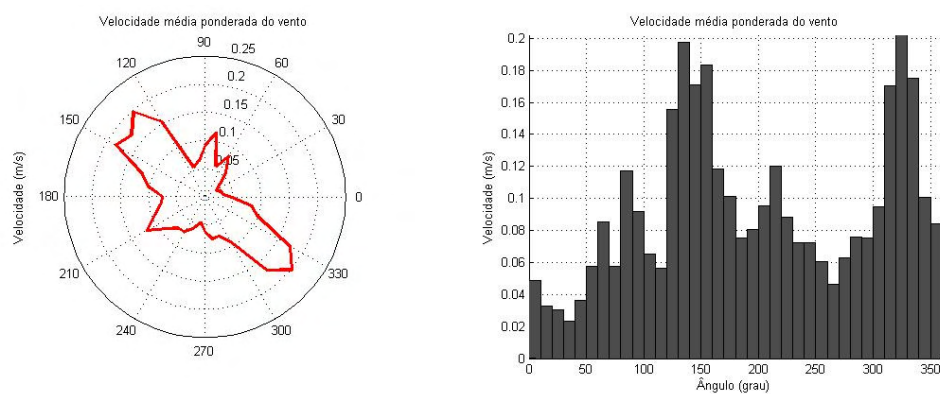


Figura 17 - Velocidade do vento - mês de Outubro (série)

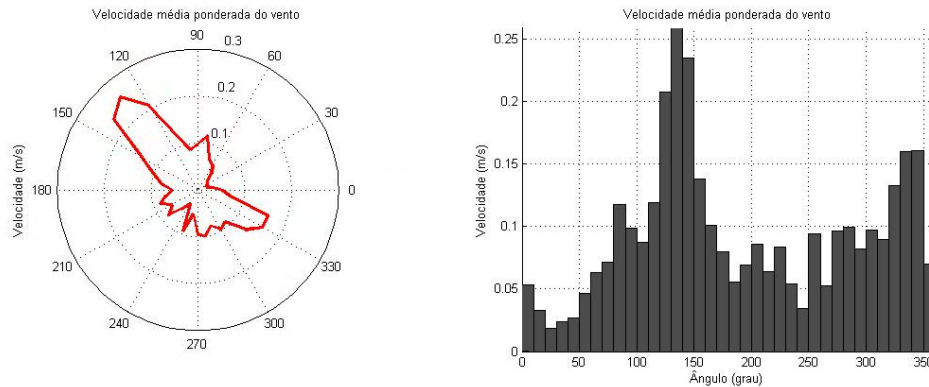


Figura 18 - Velocidade do vento - mês de Novembro (série)

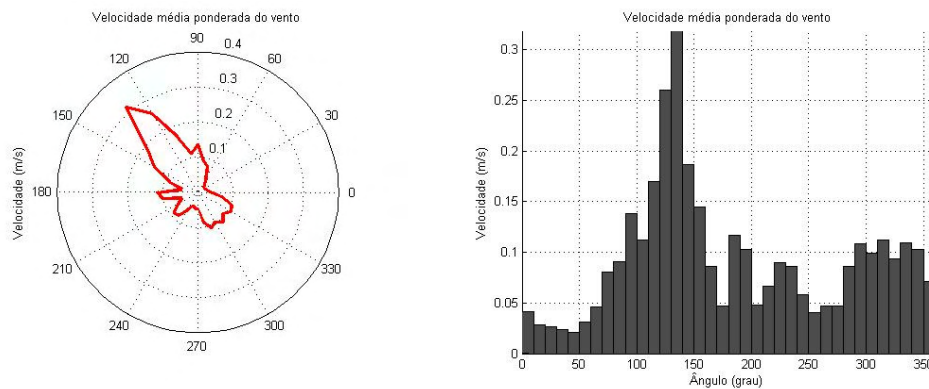


Figura 19 - Velocidade do vento - mês de Dezembro (série)

A observação das Figuras 8 à 19 mostra que de Abril a Setembro a predominância do rumo do vento é bem marcada. Neste grupo Março também poderia ser incluído. Janeiro, Fevereiro e Outubro marcam uma predominância de rumos opostos. Interessantes são os resultados de Novembro e Dezembro que apresentam predominância de rumo oposto (entre 120° e 150° , ou seja entre SE e S/SE). Uma explicação para esta mudança de predominância (já é observada muito bem em Setembro) é basicamente pela alteração sinóptica que influencia a Península Ibérica.

É sabido que o conhecimento climatológico de uma região por um período suficientemente longo permite conhecer o regime de ventos. No caso da Península Ibérica e devido à localização semi-permanente do anticiclone dos Açores pode-se afirmar que o regime de ventos seria predominantemente na direcção Norte-Sul. O Índice de NAO (North Atlantic Oscillation) é um bom indicador para se determinar

qual a tendência anual do regimes de ventos na Península Ibérica. A observação visual das figuras mostra que os ventos registados na área de estudo são provenientes de NW, o que valida a influência do anticiclone dos Açores.

Também, por se considerar importante, avaliou-se o potencial eólico para cada uma das estações do ano. As Figuras 20 à 23 mostram diferentes gráficos onde se pode recolher informação para o desenho de estratégias de intervenção. Nas figuras e de cima para baixo, de forma resumida, pode observar-se o gráfico polar que tem a ver com a velocidade média ponderada do vento. Nele está bem indicada a orientação do vento. O histograma dos ângulos obtido da distribuição dos ventos mostra a densidade de probabilidade de ocorrência de vento segundo uma dada direcção, no intervalo de 10° . O gráfico seguinte mostra a frequência dos ventos (histograma das velocidades médias) em intervalos de 1m.s^{-1} , ajustada à escala das frequências em densidade de probabilidade, por recurso à função `wblfit` do MatLab. Adicionalmente mostra-se a distribuição da velocidade média do vento em cada ângulo, quando se considera a hipótese de "quando há vento". Estas velocidades médias não contabilizam períodos em que não há vento sob uma certa direcção. Assim, calcularam-se as velocidades médias ponderadas pela frequência.

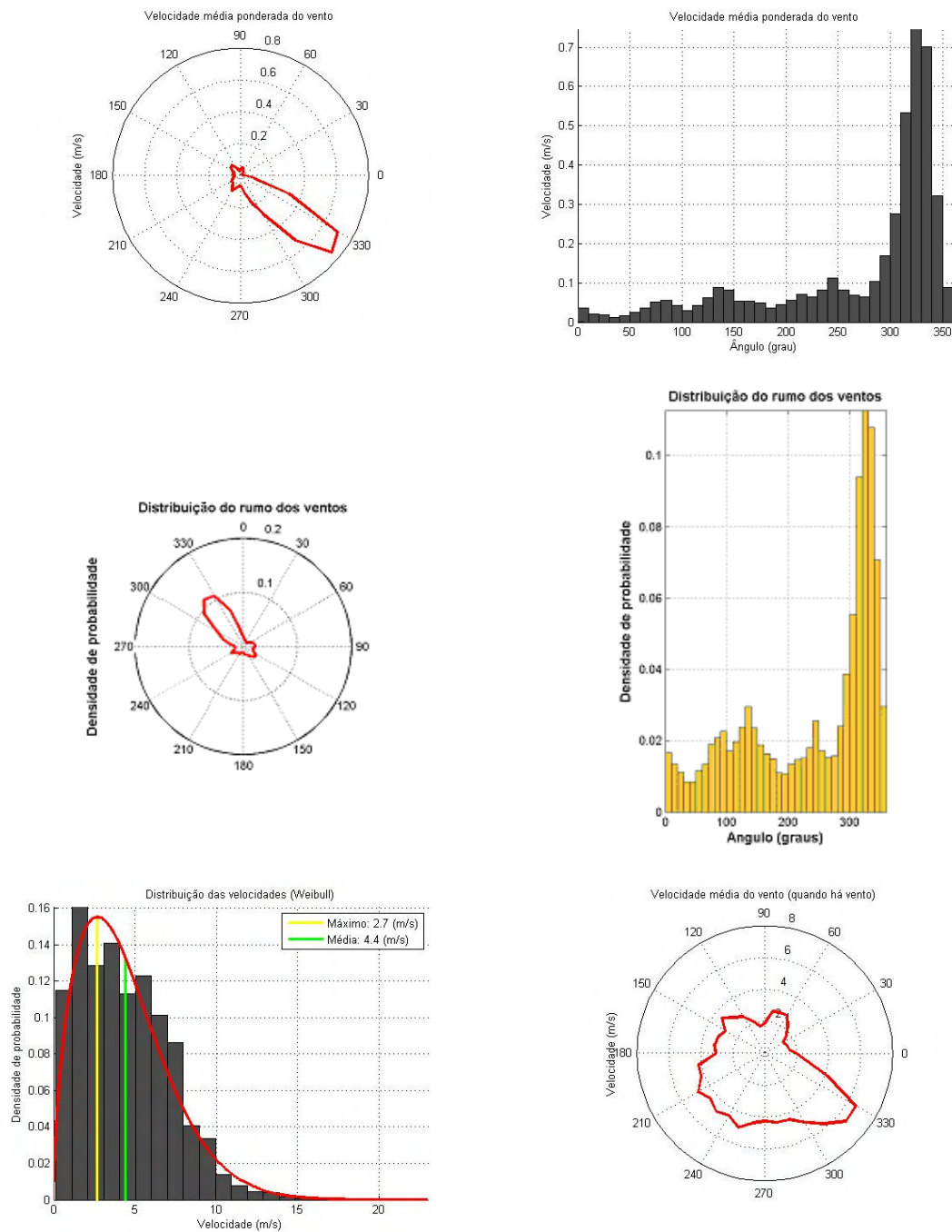


Figura 20 - Primavera (série de anos) - potencial eólico

A Figura 20 mostra a distribuição das velocidades, em que a velocidade média do vento é de $4,4 \text{ m.s}^{-1}$.

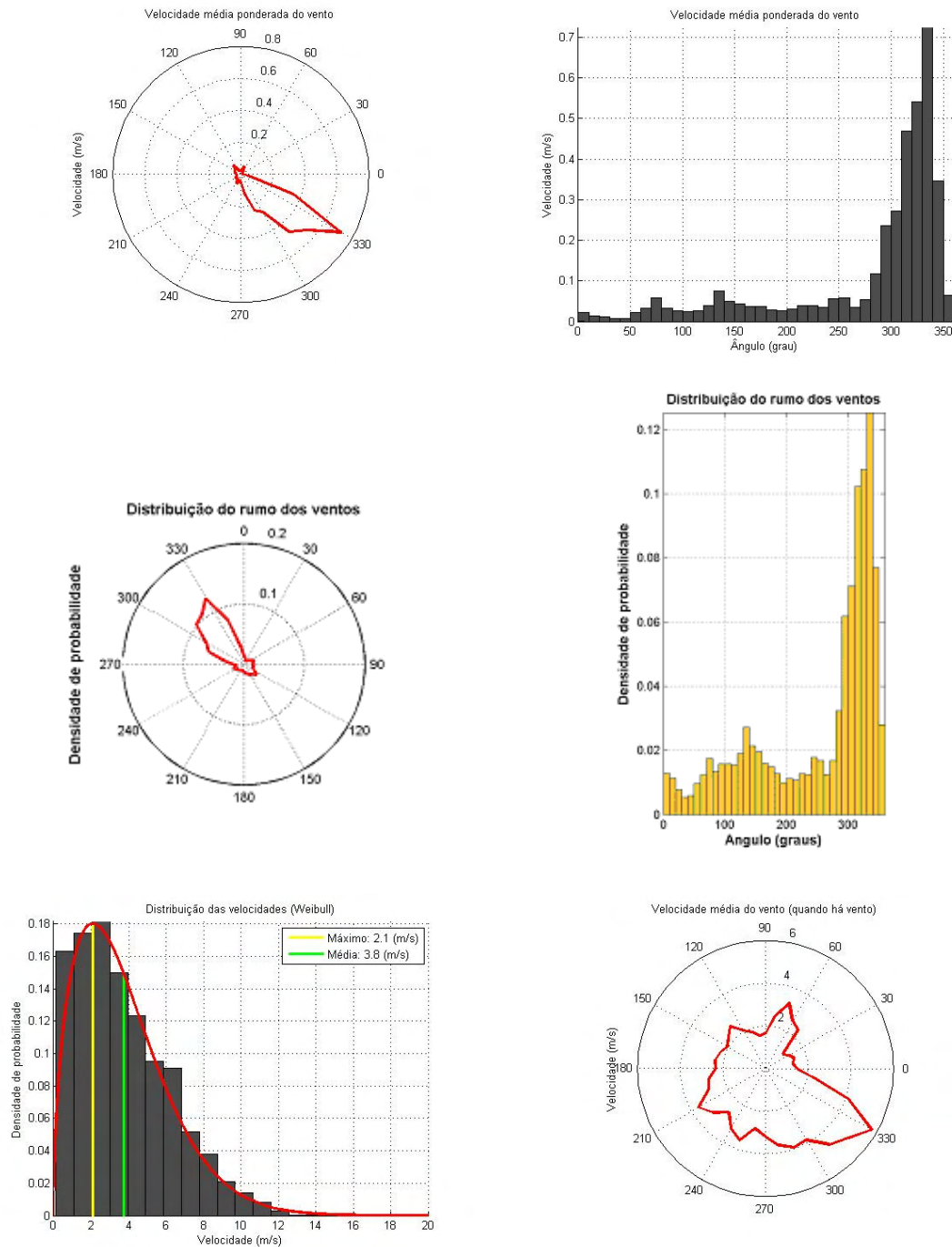


Figura 21 - Verão (série de anos) - potencial eólico

A Figura 21 mostra a distribuição das velocidades, em que a velocidade média do vento é de $3,8 \text{ m.s}^{-1}$.

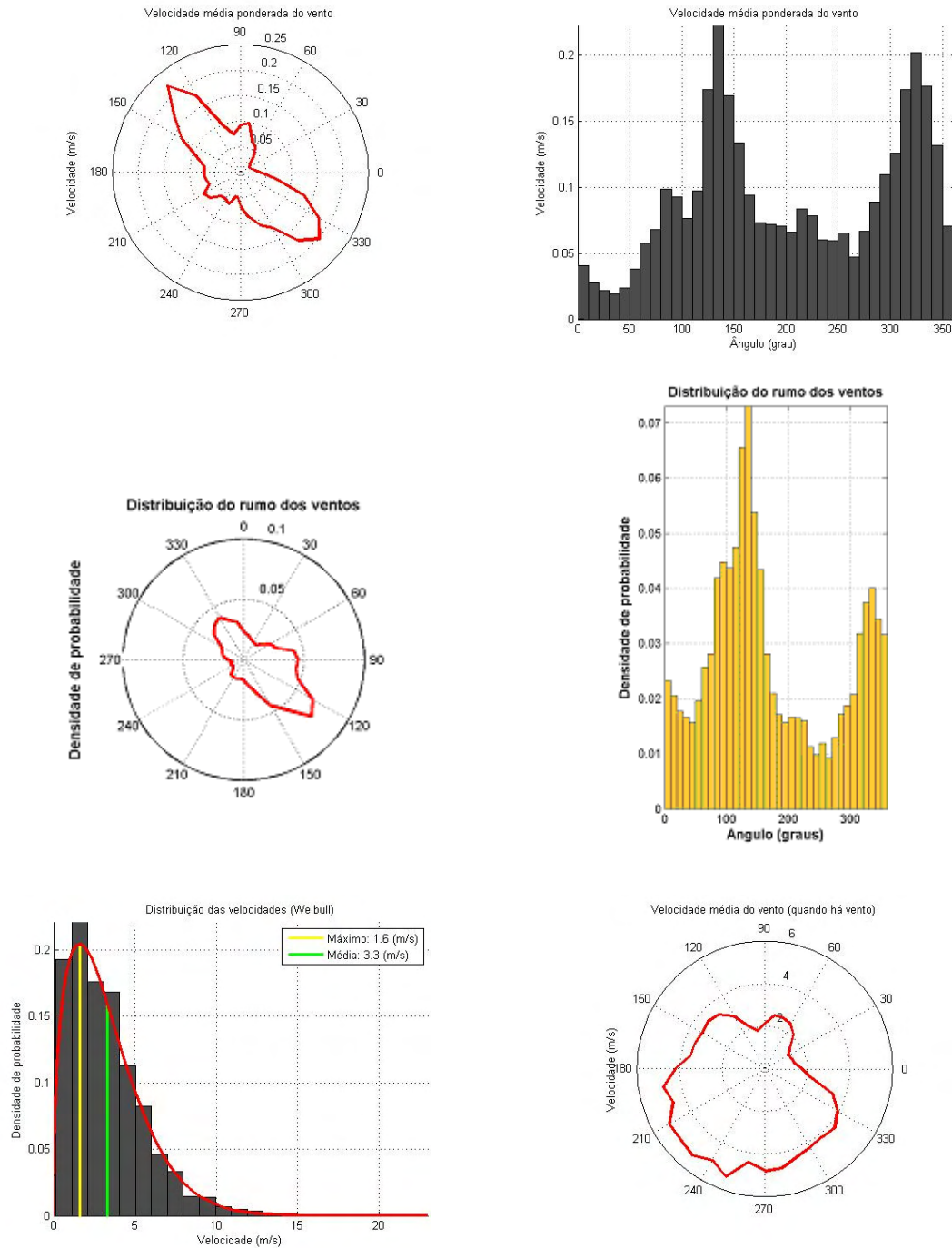


Figura 22 - Outono (série de anos) - potencial eólico

A Figura 22 mostra a distribuição das velocidades, em que a velocidade média do vento é de $3,3\text{m.s}^{-1}$.

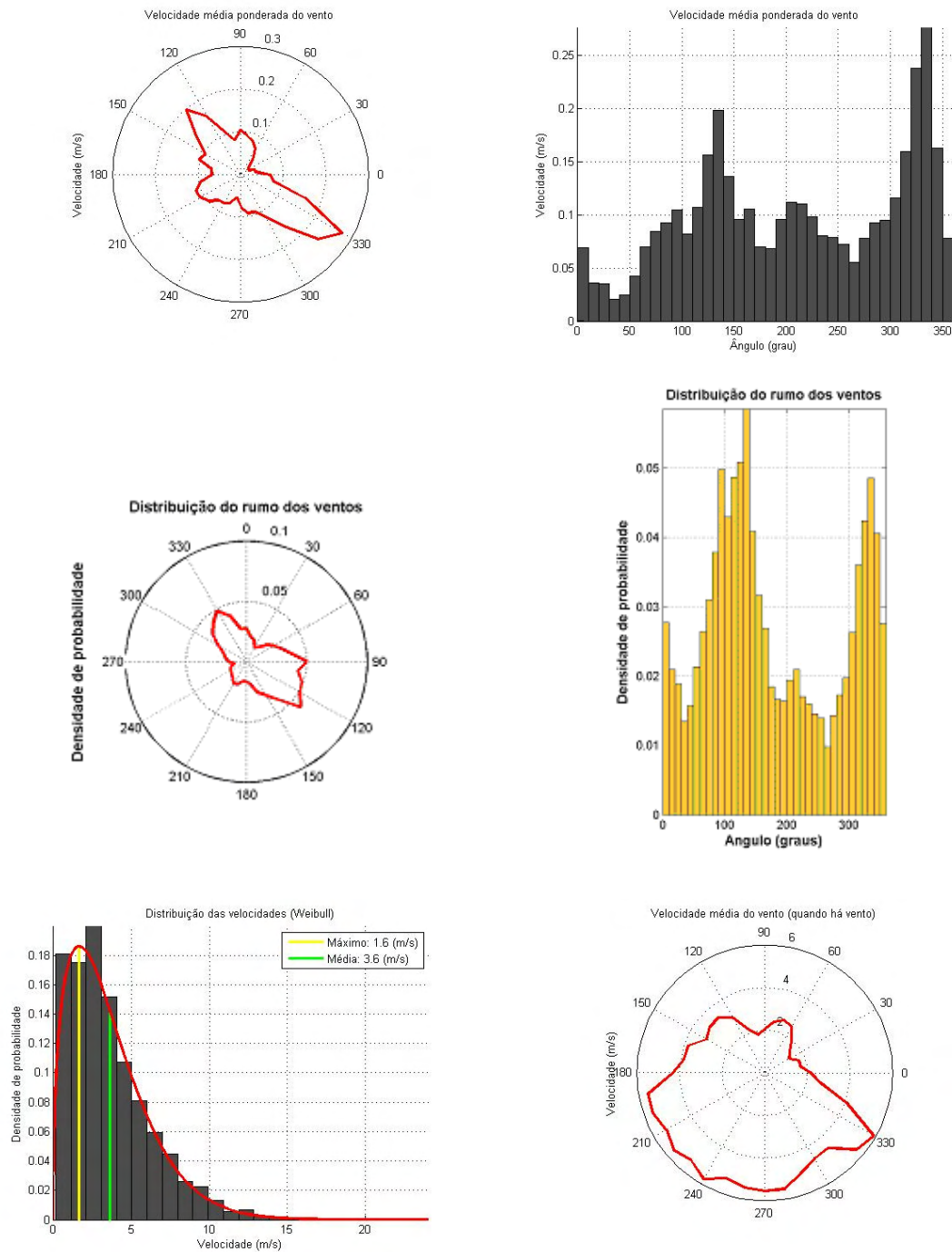


Figura 23 - Inverno (série de anos) - potencial eólico

A Figura 23 mostra a distribuição das velocidades, em que a velocidade média do vento é de $3,6 \text{ m.s}^{-1}$.

A comparação das Figuras 20 à 23 mostra que a estação Primavera é a que apresenta melhores condições para se registar o melhor potencial eólico e

consequentemente melhor energia disponível. Uma análise comparativa com os meses (desta estação do ano ou valores anual) mostra de forma inequívoca que o mês de Maio (regista uma velocidade média do vento de $4,6\text{m.s}^{-1}$) é o que oferece melhores condições de potencial eólico sendo representativo da estação Primavera.

Na Figura 24 mostram-se os resultados obtidos quando se considera a série de anos, ou seja todos os dados registados durante quatro anos. Agora apresenta-se também o gráfico obtido para a densidade de potência e distribuição de energia. A observação deste gráfico mostra que a potência total é registada para uma velocidade de $7,5\text{m.s}^{-1}$. O gráfico da densidade de probabilidade – distribuição das velocidades (Weibull) marca uma velocidade média da série de anos de $3,8\text{m.s}^{-1}$.

A Tabela 1 mostra os valores determinados para diferentes situações de análise.

É identificado o significado físico de cada coluna, na primeira linha. A segunda linha mostra os valores para todos os dados da série de anos.

Da terceira à sexta linha são mostrados valores considerando os meses das estações do ano (Primavera, Verão, Outono e Inverno). A última linha mostra valores de Maio, por ser o mês com registo do maior potencial eólico e ser considerado um padrão da série de anos.

A observação atenta da Tabela 1 sugere que a Primavera regista os melhores valores. Maio parece contribuir bastante bem para o valor registado. Os piores resultados são registados durante o Outono e Inverno.

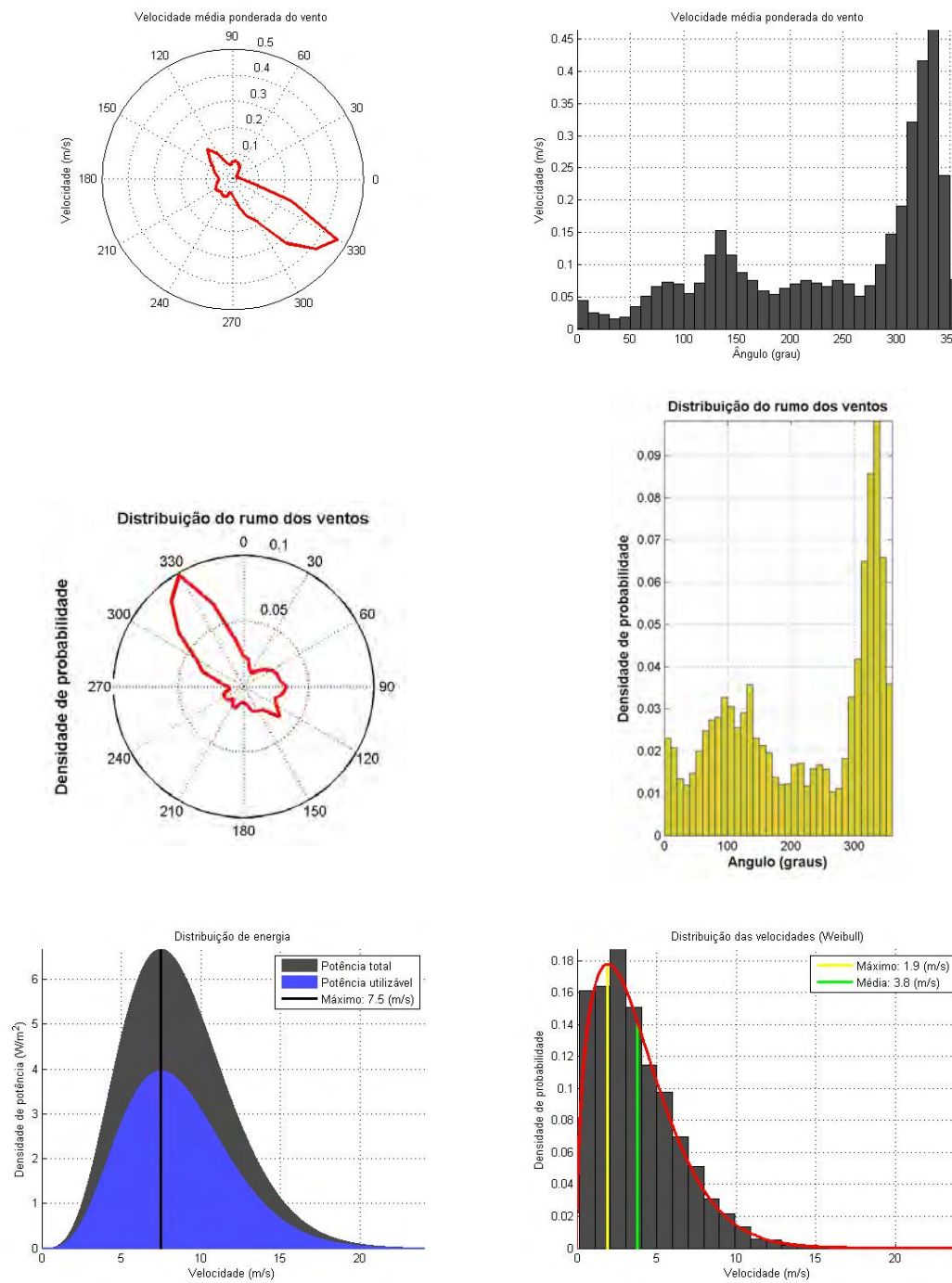


Figura 24 - Janeiro a Dezembro (série de anos) - potencial eólico

Tabela 1 - Valores determinados para diferentes situações de análise

CAMPUS SANT. AVEIRO-PORTUGAL	Velocidade média do vento (m/s)	Potência eólica (W/m^2)	Potência máxima a (m/s)	Energia eléctrica estimada* (GWh/ano)
Série de anos	3,8	33.7	7,5	0,876
Primavera	4,4	52.4	8,1	1,360
Verão	3,8	33.7	7,2	0,876
Outono	3,3	22.1	6,6	0,574
Inverno	3,6	28.7	7,4	0,745
Maio	4,6	59.9	8,8	1,554

*valor a partir do limite de Betz (aerogerador com 80m de diâmetro)

A Figura 25 mostra para a energia eléctrica estimada anual (GWh) a relação entre os valores obtidos para cada estação do ano face ao valor da série de anos. Inequivocamente é a Primavera que oferece melhor resultado, que é condicionado pelo valor registado por Maio.

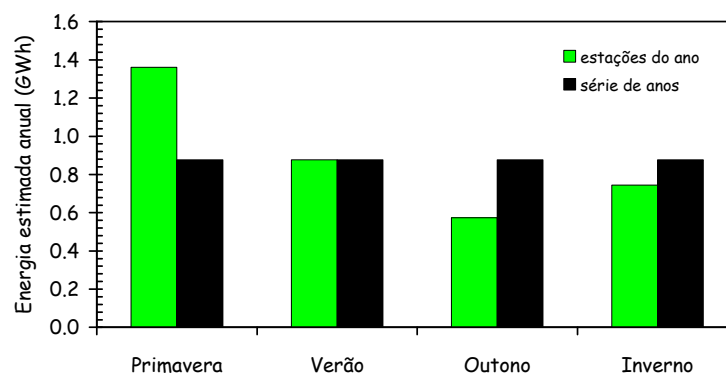


Figura 25 - Evolução do potencial eólico - energia estimada anual

Ainda a observação da Figura 25 mostra ainda que Outono e Inverno são as piores estações do ano (apresentam valores inferiores à da série de anos).

Na Tabela 2 são indicados os valores registados para os diferentes meses do ano. Os valores de cor "verde" estão acima dos valores da série de anos que é indicada sob a cor "amarela", enquanto os valores de cor "laranja" estão abaixo dos valores registados da série de anos. Maio mostra ser um excelente mês em termos eólicos.

Tabela 2 - Valores por mês e da série de anos

CAMPUS SANT. AVEIRO-PORTUGAL	Velocidade média do vento (m/s)	Velocidade do vento máxima* (m/s)	Potência eólica (W/m ²)	Potência máxima à velocidade (m/s)	Energia eléctrica estimada** (GWh/ano)	Rumo do vento (°)
Janeiro	3.1	1.4	18.3	6.5	0.476	SE ou NW
Fevereiro	3.8	1.7	33.7	7.7	0.876	NW***
Março	4.0	2.0	39.4	7.9	1.022	NW
Abril	4.3	2.4	48.9	8.1	1.270	NW
Maio	4.6	2.7	59.9	8.8	1.554	NW
Junho	4.3	3.0	48.9	7.5	1.270	NW
Julho	4.3	2.6	48.9	7.9	1.270	NW
Agosto	3.9	2.2	36.5	7.4	0.947	NW
Setembro	3.0	1.8	16.6	5.7	0.431	NW
Outubro	3.4	1.5	24.2	7.0	0.628	NW****
Novembro	3.4	1.7	24.2	6.7	0.628	SE*****
Dezembro	3.4	1.4	24.2	7.1	0.628	SE
Série de anos	3.8	1.9	33.7	7.5	0.876	NW

*densidade de probabilidade

**valor a partir do limite de Betz (aerogerador com 80m de diâmetro)

***também SE e SW

****também SE

*****também NW

É bom ressaltar que os dados indicados nas Tabelas 1 e 2 são projectados em termos de valores anuais, ou seja, os dados para cada mês ou para estação do ano são projectados em termos de 365 dias, de modo a serem comparáveis com o valor da série de anos que representa os 365 dias do ano.

Na Figura 26 mostra-se o resultado obtido para as três velocidades que determinam características para o potencial eólico, ou seja a velocidade média do vento, a velocidade máxima pela distribuição de Weibull e a velocidade referente ao potencial máximo.

A observação da Figura 26 continua a mostrar que Maio apresenta os melhores resultados face aos outros meses do ano e face ao valor indicado para a série de anos.

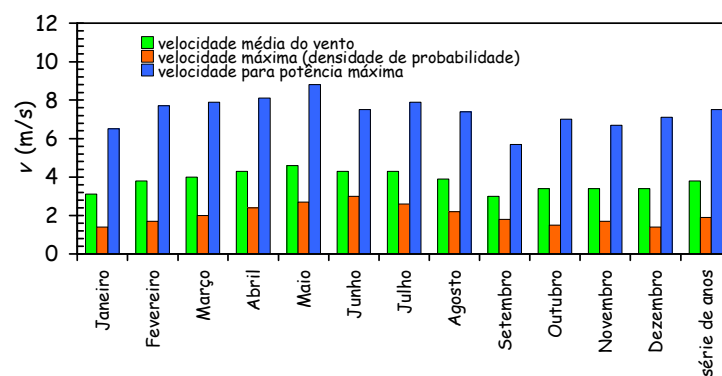


Figura 26 - Velocidades que caracterizam o potencial eólico

Capítulo 4



4. Considerações finais e perspectivas futuras

Hoje em dia, a problemática das alterações climáticas é abordada por diferentes áreas de intervenção, nomeadamente investigação, social, económica, política.

O aquecimento global condicionado pela emissão de gases de efeito de estufa é um dos maiores desafios quer a nível de país quer a nível mundial. As Conferências Mundiais realizadas em Bali e agora, mais recentemente, em Copenhague foram mais uma tentativa de alerta acerca da utilização de combustíveis fósseis.

O efeito de estufa está a condicionar um aumento da temperatura do ar e este aumento é mais evidente no valor da temperatura mínima do ar. Nestes termos um impacto negativo tem a ver com o degelo. Espera-se que zonas costeiras “baixas” sejam inundadas o que provocará um deslocamento de seres vivos. Haverá consequências graves sociais e políticas (IPCC, 2001; IPCC, 2007).

As fontes renováveis de energia são uma excelente alternativa para minimizar as questões problemáticas energéticas e a angústia política e social que se avizinha.

Estudos técnicos económicos financeiros são importantes para conhecer o potencial eólico de um local.

Consideramos ser de extrema importância realizar uma análise económica acerca de: metas do Governo; custo por tecnologia; investimento global nos parques eólicos já instalados, avaliação da rentabilidade dos parques eólicos instalados e avaliação de tarifa. A integração na rede (REN, S.A. para a MAT – Muita Alta Tensão e EDP – Distribuição, S.A. para a AT – Alta Tensão, MT – Média Tensão e BT – Baixa Tensão) passa obrigatoriamente pelo nível de tensão; ligação à rede; localização geográfica e desempenho dos aerogeradores face a incidentes na rede.

Nesta investigação avaliaram-se as características do vento com dados anuais registados durante quatro anos. Os resultados obtidos permitem avaliar a performance do local e a viabilidade de instalação de aerogeradores. Salienta-se que a velocidade média determinada para uma altitude de 60m e para a série de anos foi de $3,8\text{m.s}^{-1}$.

O valor da velocidade média de $3,8\text{m.s}^{-1}$ deve ser valorizado por apresentar um desvio absoluto de 2.2 a $3,2\text{m.s}^{-1}$ face ao indicado no Atlas europeu do vento e para 50m acima do solo (<http://www.windatlas.dk>). Esta situação indicia que o local investigado parece não corresponder ao valor indicado no atlas eólico e que lhe confere condições de alguma "fraqueza" para a instalação de aerogeradores. De notar que normalmente os fabricantes de aerogeradores indicam como valor de accionamento cerca de 3 a 4m.s^{-1} .

É o mês de Maio e a série para a Primavera que indiciam as melhores características de vento para a eventual instalação de aerogeradores. De facto, os valores médios da velocidade são de $4,6\text{m.s}^{-1}$ e $4,4\text{m.s}^{-1}$ respectivamente. Assim, a avaliação de energia disponível é para estes dois casos bastante significativa face às outras combinações (mensal, anual ou estação do ano). O potencial eólico depende do cubo do valor da velocidade e a incerteza da intensidade do vento condiciona um erro relativo de factor 3 na potência eólica.

Não foi possível avaliar a relação entre a energia disponível estimada e os consumos efectivos, por mês, para o local de estudo.

A investigação, mesmo dentro de todas as limitações encontradas durante o desenvolvimento desta dissertação, parece ser oportuna para o conhecimento do potencial eólico do local.

Consideramos que um mapa de potencial eólico por locais seria oportuno construir para se adoptar, no futuro, estratégias de implantação, melhoramento ou aumento de parque eólico, já existente.

No futuro espera-se avaliar o potencial eólico em altitude para a selecção de aerogeradores, se forem facultados os dados de consumo energéticos.

Um estudo interessante e muito importante seria traçar para o local um mapa acerca do valor da intensidade da velocidade de corte. Este resultado permitiria usar a lei logarítmica para o vento em altitude. A rugosidade do local deveria, também, ser avaliada. Havendo uma torre de 30m no local, este estudo seria muito interessante. A influência de brisa no potencial eólico seria então avaliada.

Uma análise acerca da estabilidade da atmosfera seria muito interessante. Para o melhor dia de potencial eólico poder-se-ia, a partir de mapas sinóticos, avaliar as condições que o suscitaram. O valor médio da velocidade poderia ser comparado numa primeira aproximação com a aproximação geostrófica e considerações poderiam ser deduzidas.

Estas são algumas linhas orientadoras para trabalho futuro.

Referências

- Gupta, B.K., 1986. Weibull parameters for annual and monthly wind speed distributions for five locations in India. *Solar Energy*, 37 (6), 469-671.
- Henessey, J.P., 1977. Some aspects of wind power statistics. *Journal Applied Meteorology*. 16 (2), 119-128.
- Holton, J.R., 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Volume 88 in the International Geophysics Series. Edited by Renata Dmowska and James R. Holton. Elsevier Academic Press.
- INFO-Jan.Fev.Mar, 2008. *Ordem dos Engenheiros*, 14.
- IPCC, 2001. *Intergovernmental Panel on climate change Technical Summary. A Report Accepted by Working Group I*, wgI_ts.pdf. <http://www.ipcc.ch/pub/wg1TARtechsum.pdf>.
- IPCC, 2007. *Climate change 2007: the physical science basis summary for policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Paris: IPCC, Working Group I.
- Justus, C.G., Hargraves, W.R. and Mikael, A., 1978. Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journal Applied Meteorology*. 17 (3), 350-353.
- Justus, C.G. and Mikail, A., 1976. Height variation of wind speed and wind distribution. *Geophys. Res. Letter*, 3, 261-264.
- Li, M. and Li, X., 2005. MEP-type distribution function: a better alternative to Weibull function for wind speed distributions. *Renewable Energy*, 30, 1221-1240.
- Troen I. and Petersen E.L., 1989. *European Wind Atlas*. Published for the Commission of the European Communities by Risø National Laboratory. ISBN 87-550-1482-8. Roskilde, Denmark. 656 pages.
- Verdecia, P.F., 1997. *Sistemas aislados de la red eléctrica*. Principios de conversión de la energía eólica. Madrid: CIEMAT, 2.13-2.37.